

PHY6505: Physique de la matière condensée

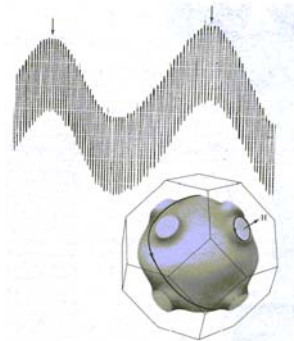
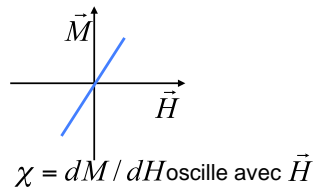
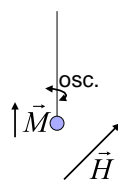
Cours 8 Surface de Fermi

François Schiettekatte
Université de Montréal
Automne 2010

1

Déterminer la surface de Fermi

- Beaucoup de propriétés des métaux sont déterminées par les e^- près du niveau de Fermi et par la surface de Fermi
- Effet de Haas-van Alphen
 - Oscillations dans $\chi = dM/dH$



Autres phénomènes qui présentent des oscillations

- Conductivité électrique
- Magnétorésistance
- Atténuation du son
- Effet Peltier
- Thermoélectricité
- Conductivité thermique

Onsager:

$$\Delta\left(\frac{1}{H}\right) = \frac{2\pi e}{\hbar c} \frac{1}{A_e}$$

Figures pp 266-268

3

Électrons dans $\vec{H} = H\hat{z}$

e⁻ libres: $\varepsilon_v(k_z) = \frac{\hbar^2}{2m}k_z^2 + (v + \frac{1}{2})\hbar\omega_c$, $\omega_c = \frac{eH}{mc}$, $\nu \sim \frac{\varepsilon_F}{\hbar\omega_c} \sim 10^4$ si $H \sim 1$ T

e⁻ semi-classiques: $\varepsilon_{v+1}(k_z) - \varepsilon_v(k_z) = \hbar\omega = h/T(\varepsilon_v(k_z), k_z)$ selon principe de correspondance

$$\text{où } T(\varepsilon_v(k_z), k_z) = \frac{\hbar^2 c}{eH} \frac{\partial A(\varepsilon_v, k_z)}{\partial \varepsilon} \quad (\text{cours 7})$$

$$\Rightarrow (\varepsilon_{v+1}(k_z) - \varepsilon_v(k_z)) \frac{\partial A(\varepsilon_v, k_z)}{\partial \varepsilon} = \frac{heH}{\hbar^2 c} = 2\pi \frac{eH}{\hbar c}$$

$$\text{comme } \nu \text{ est élevé } \frac{\partial A(\varepsilon_v, k_z)}{\partial \varepsilon} \approx \frac{A(\varepsilon_{v+1}) - A(\varepsilon_v)}{\varepsilon_{v+1} - \varepsilon_v}$$

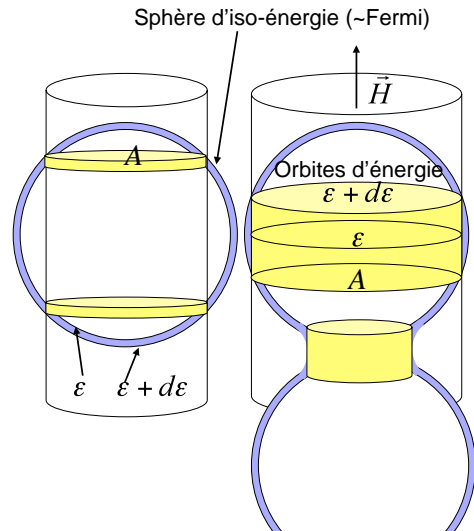
$$\Rightarrow A(\varepsilon_{v+1}) - A(\varepsilon_v) = 2\pi \frac{eH}{\hbar c} \quad \text{donc aires quantifiées}$$

$$\Delta A = \frac{2\pi e}{\hbar c} H, \quad A = (v + \lambda)\Delta A, \quad v \in \mathbb{N}$$

4

Oscillations = divergence du nombre d'états dans les extrema

- La densité d'états diverge chaque fois que
 - Grande densité de k_z donc beaucoup d'orbites possibles
- Survient pour les orbites extrêmes
 - Plusieurs extrema : combinaison de fréquences



Pic à chaque fois que $\underbrace{(\nu + \lambda)\Delta A}_{\text{produit=cte}} = A_{\text{extrema}}(\epsilon_F)$

- si $\nu + \lambda$ passe de 10 à 11, ΔA doit passer de $A/10$ à $A/11$
- mais ΔA ne dépend que de constantes sauf H
- ainsi, pics à $H=10/11, 11/12, \dots$
- donc à intervalle régulier de $\Delta\left(\frac{1}{H}\right) = \frac{2\pi e}{\hbar c} \frac{1}{A_{\text{extr.}}(\epsilon_F)}$
- Oscillations régulières en $1/H$ proportionnelles à l'inverse de la surface d'orbite extremum dans l'espace \vec{k} perpendiculaire à \vec{H}
 - Différentes orientations, différents extrema

Observable seulement à basse température et échantillons « parfaits »

■ Conditions d'observation

- $k_B T < \hbar \omega_c = \hbar \frac{eH}{mc} \Rightarrow \frac{T}{H} < \sim 1 \text{ Kelvin/Tesla}$
- observables à quelques Kelvin si $H=1\text{T}$
- Orbites complètes
 - τ long
 - échantillons purs, monocristallins, de grande taille

7

Autres mesures de la surface de Fermi

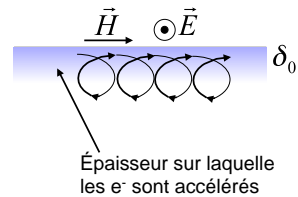
- Effets magnéto-acoustiques
 - Champ électrique oscillant créé par la vibration des atomes
 - Couplage lorsque $l_c = (n + \frac{1}{2})l$
 - l_c : diamètre de l'orbite d'un électron
 - l : longueur d'onde de l'oscillation
- Épaisseur de peau anormale (micro-ondes)
 - Classique: $\delta_0 = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega}}, \delta_0 \gg l$
 - Si $\delta_0 \ll l$ l'épaisseur de peau et la réflectivité sont déterminés par des détails de la surface de Fermi

8

Autres mesures de la surface de Fermi

□ Résonance cyclotronique

- Mesure de $\partial A / \partial \varepsilon$
- Si $T = nT_E$: résonance car \vec{E} a complété un nombre entier de périodes chaque fois que l'électron retourne dans δ_0
- $T = \frac{\hbar^2 c}{eH} \frac{\partial A}{\partial \varepsilon}$
- $\omega_c = \frac{1}{2\pi T} = \frac{eH}{2\pi\hbar^2 c} \frac{\partial A}{\partial \varepsilon}$, $\omega = n\omega_c$
- $\frac{1}{H} = \frac{2\pi eH}{\hbar^2 c \omega} \frac{1}{\partial A}{\partial \varepsilon} n$



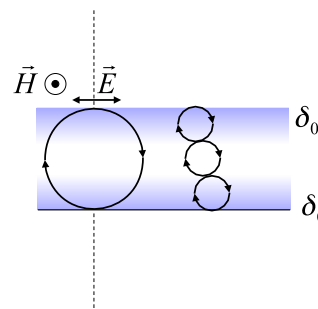
... analyse compliquée

9

Autres mesures de la surface de Fermi

□ Effet Gantmakher

- Échantillons minces
- Orbites qui "fittent" entre les deux surfaces
- Même si $\delta_0 \ll \ell$, les e^- reproduisent l'onde sur l'autre face
- Transmission résonnante



10

Surface de Fermi de certain métaux

- Monovalents (alcalins, nobles)
- Divalents (e^- en paire)
- Trivalents (Al)

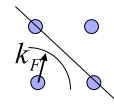
11

Monovalents

- Alcalins (Na, K, Rb mais pas Li)
 - gaz rare + $e^- s^1$
 - e^- de cœur avec ϵ très différente de l' $e^- s^1$
 - 1 e^- de valence
 - $\frac{k_F^3}{3\pi^2} = \frac{N}{V} = \frac{2}{a^3} \Rightarrow$

$$k_F = (3\pi^2)^{1/3} \left(\frac{2}{a^3}\right)^{1/3} = \underbrace{(3\pi^2)^{1/3}}_{=1} \frac{2\pi}{(8\pi^3)^{1/3}} = 0.62 \left(\frac{2\pi}{a}\right) < \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{2\pi}{a}\right)$$

↑
facteur 0.877



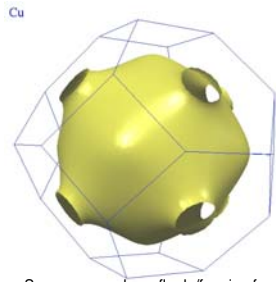
- Surface de Fermi ~ sphère à 0.1% près

12

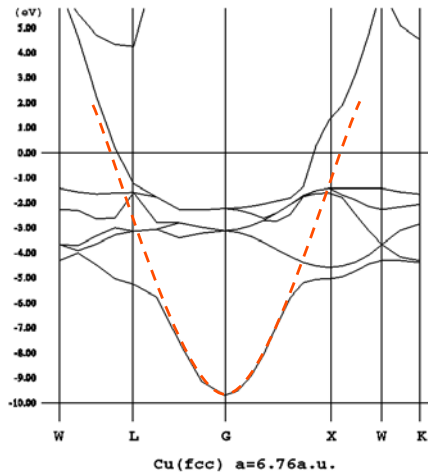
Monovalents

- Métaux nobles: Cu, Ag, Au

- e^- de valence quasi-libre
- bande d pas loin
- surface de Fermi distordue



Source: www.phys.ufl.edu/fermisurface/

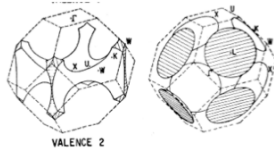


Source: www.bandstructure.jp/Table/simptab.html 13

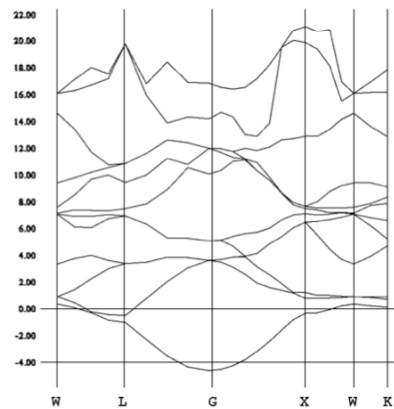
Divalents

- Devraient être isolants puisque $e^- s^2$ pairés
- Mais la surface de Fermi touche au plan de Bragg
 - Poches d'électrons

Walter A. Harrison, Phys. Rev. 118, 1190 (1960)



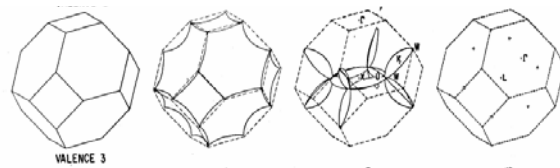
- Cubiques: Ca, Sr, Ba
- Hexagonaux: Be, Mg, Zn, Cd
 - Surface très complexe
 - Couplage spin-orbit qui bousille les mesures



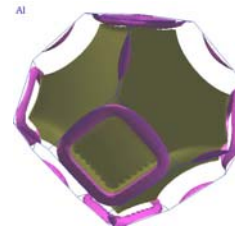
Source: www.bandstructure.jp/Table/simptab.html 14

Trivalents: Al

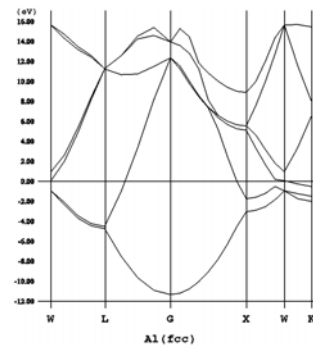
- 3 e⁻ de valence
- Surface de Fermi contenue dans les zone II,III,IV
 - Le faible pot. périodique élimine la 4^e zone



Walter A. Harrison, Phys. Rev. 118, 1190 (1960)



Source: www.phys.ufl.edu/fermisurface/



Source: www.bandstructure.jp/Table/simptab.html

Trivalents: Al

- 2 des 3 e⁻ de valence remplissent la première zone
- 3^e e⁻ de valence réparti dans zone II et III

$$n_e^{II} + n_e^{III} = \frac{n}{3}$$

- Mais il y a de la place pour 2 e⁻ par zone

$$n_e^{II} + n_h^{II} = 2 \left(\frac{n}{3} \right) \quad (\text{somme états pleins + libres} = 2 e^-)$$

- Donc concentration de trous = 1/3 de la densité d'e⁻ de valence: explique l'effet Hall

$$\Rightarrow n_e^{III} - n_h^{II} = -\frac{n}{3}$$

16

La suite

- Approximation du temps de relaxation
- Interaction d'échange
- Écrantage
- Liquide de Fermi

- Illustrations de la surface de Fermi
 - www.physik.tu-dresden.de/~fermisur/
 - www.phys.ufl.edu/fermisurface/